

## CONDENSADOR DE 4 ETAPAS PARA GAS DE PIRÓLISIS PARA OBTENCIÓN DE ACEITE

María Sol Gutierrez<sup>1</sup>, Mercedes Lozano Rus<sup>2</sup>, Leisa Maria Magallanes<sup>3</sup>, Norberto Canale<sup>2</sup>,  
Leonardo Molisani<sup>1</sup> y María Fernanda Gayol<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Acústica y Vibraciones-IDAS UNRC-CONICET

Ruta 36 Km 601, Río Cuarto, Córdoba - [mrgutierrez@ing.unrc.edu.ar](mailto:mrgutierrez@ing.unrc.edu.ar) , [lmolisani@vt.edu](mailto:lmolisani@vt.edu)

<sup>2</sup>División de I+D+i, Canale S.R.L - Pedro Patat Norte 1570, Colonia Caroya, Córdoba  
[mercedeslozanorus@gmail.com](mailto:mercedeslozanorus@gmail.com), [canale@canalesrl.com.ar](mailto:canale@canalesrl.com.ar)

<sup>3</sup> Grupo SIMAP IDAS UNRC-CONICET - Ruta 36 Km 601, Río Cuarto,  
Córdoba [lmagallanes@ing.unrc.edu.ar](mailto:lmagallanes@ing.unrc.edu.ar) , [mgayol@ing.unrc.edu.ar](mailto:mgayol@ing.unrc.edu.ar)

### RESUMEN

La pirólisis es un proceso en el cual se descompone materia orgánica u otros materiales a altas temperaturas en ausencia de oxígeno generando una corriente gaseosa como principal efluente. Esta corriente egresa del reactor a 400 °C aproximadamente y está compuesta por gases volátiles y no volátiles, los cuales, al disminuir la temperatura condensan y forman aceites con alto poder calorífico. El objetivo de este trabajo es diseñar un condensador de calor siguiendo la tipología de tubo y coraza capaz de ser utilizado en un proceso de pirólisis para extraer calor, de forma que todos aquellos compuestos no volátiles presentes en la corriente condensen en forma de aceite. Para esto se diseñó un equipo que cumpla con las condiciones necesarias para enfriar la corriente gaseosa generada en el reactor al introducir 10 kg de neumáticos en desuso. Una vez obtenidas las dimensiones del equipo se procede a realizar pruebas tales como el cálculo de la presión interna sobre las paredes del intercambiador, análisis de deformaciones por temperaturas, pérdida de carga y simulación de flujo de partículas utilizando mecánica computacional, además de un análisis exhaustivo del material a utilizar. De esta investigación se obtuvo como resultado un aparato condensador cuyas dimensiones son 1000 mm de largo y 200 mm de diámetro con 4 salidas para distintas clases de aceites dependiendo de su temperatura de condensación. Para maximizar la zona de contacto se introducen 7 deflectores longitudinales, que aumentaran la trayectoria del gas dentro de la coraza, mientras que el agua utilizada como agente refrigerante circula por 10 tubos a contracorriente. En este trabajo se modeló y diseñó exitosamente un condensador especial para gas pirolítico.

**Palabras clave:** Condensador, Pirólisis, Modelado, Simulación

## 1. INTRODUCCIÓN

En el año 2021 el 77% de la energía consumida a nivel mundial fue generada a partir de la quema de combustibles fósiles [1], a pesar de ser este proceso la principal fuente de formación de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero (GEI). Actualmente, en diversos estudios realizados se detectó que la emisión de GEI no es solo un problema ambiental, sino que afecta significativamente a la salud de los humanos y animales [2,3]. Por esto, se procedió a buscar formas de energía renovable como reemplazo a la quema de combustibles fósiles, con huella de carbono neta igual a 0.

Si bien existen diversas formas de energía renovable, una de las principales es la obtención de energía a partir de biocombustibles. Este grupo de hidrocarburos capaces de generar energía eléctrica se obtienen a partir de diversos procesos que tienen en común la utilización de biomasa o residuos como materia prima. En este trabajo se analizará puntualmente el proceso de pirólisis. La pirólisis es un proceso complejo, multi-etapa, en el cual la materia prima se descompone en ausencia de oxígeno a temperaturas entre 300-600 °C para formar gases y compuestos carbonosos sólidos. La corriente gaseosa de salida se enfría de forma que una porción de la misma condensa generando aceite de pirólisis. Este es un hidrocarburo líquido de color marrón oscuro que al ser destilado puede adquirir propiedades similares al diésel, lo cual lo hace una buena alternativa como biocombustible [4].

Por esto, es importante dentro del proceso de pirólisis la elección de un condensador adecuado. El tipo y tamaño del mismo está basado en el estado de agregación del fluido, sus propiedades (corrosión, viscosidad, entre otras), el rango de temperatura, la presión de trabajo, y otras propiedades termodinámicas. Otro aspecto a tener en cuenta es que durante el enfriamiento de la corriente gaseosa se generan alquitranes, los cuales representan el problema principal de este tipo de procesos. Estos se depositan sobre los tubos o dentro de las cañerías, generando una disminución en el rendimiento del intercambiador y un posible “taponamiento” de las cañerías. Por otro lado, el aceite de pirólisis es ligeramente corrosivo y naturalmente ácido por los compuestos químicos que lo forman, lo que conlleva a que la elección del material a utilizar sea un punto de interés del análisis [5].

El objetivo de este trabajo fue diseñar un condensador capaz de disminuir la temperatura del gas de salida obtenido al pirolizar 10 kg de materia prima hasta la condensación de toda la fracción condensable. Se simuló el flujo de ambas corrientes dentro del intercambiador con el objetivo de obtener las cargas térmicas para ingresar como condiciones de carga en un análisis estructural. Luego se probó la eficiencia y desempeño del modelo obtenido realizando pruebas de esfuerzos, presiones y se determinó el material más adecuado para cumplir con las condiciones del fluido circulante.

## 2. MODELO DE CINÉTICA QUÍMICA

Se simuló un reactor de pirólisis mediante procesos termoquímicos para obtener información de la corriente de salida. Así se determinó la fracción másica de cada componente en el producto, el caudal másico del mismo y su temperatura, parámetros que serán luego utilizados para diseñar el intercambiador de calor adecuado.

Para que la corriente de salida del pirolizador se enfríe debe ponerse en contacto indirecto con una corriente fría. En este prototipo se utilizó agua como fluido refrigerante la cual circulará en un circuito cerrado con un caudal de 100 kg/h. Se planteó un caudal de agua lo suficientemente alto como para cumplir los requerimientos del proceso sin tener cambios significativos en su temperatura, de modo de no ser necesaria una torre de enfriamiento.

Como datos de entrada en la simulación de la corriente caliente, se ingresaron los valores de caudales másicos y su composición junto con las temperaturas, tanto de entrada como la de salida objetivo. En cuanto a la corriente de agua, se ingresó su flujo másico y la temperatura de entrada, dejando a la temperatura de salida como un grado de libertad necesario para que la simulación converja a un modelo adecuado. Se le fijó también la condición de que el fluido caliente circule por la coraza a contracorriente del fluido frío que lo hará por los tubos. Esto se decidió con el objetivo de poder quitar el condensado a medida que se genere y que en caso de generarse alquitranes estos no circulen por dentro de los tubos evitando que puedan ser tapados.

Una vez establecidos estos parámetros en la simulación se obtienen las configuraciones adecuadas para el proceso planteado. Dentro de los modelos propuestos en la simulación se optó por un intercambiador de tubo y coraza tipo BEM de 1000 mm de largo y 200 mm de diámetro. Este contará con 4 boquillas de salida para poder eliminar distintas clases de condensado sin mezclarse entre ellos y 7 deflectores longitudinales de forma que el gas tenga más superficie de contacto con los tubos fríos. El fluido caliente realizará un paso por la coraza de la misma forma que el fluido frío realizará un paso por los 10 tubos que contendrá el arreglo.

Una vez obtenido el modelo propuesto por la simulación se realizan las pruebas estructurales mediante una simulación por elementos finitos (EF). Se muestra en la Figura 1 una imagen del modelo propuesto.

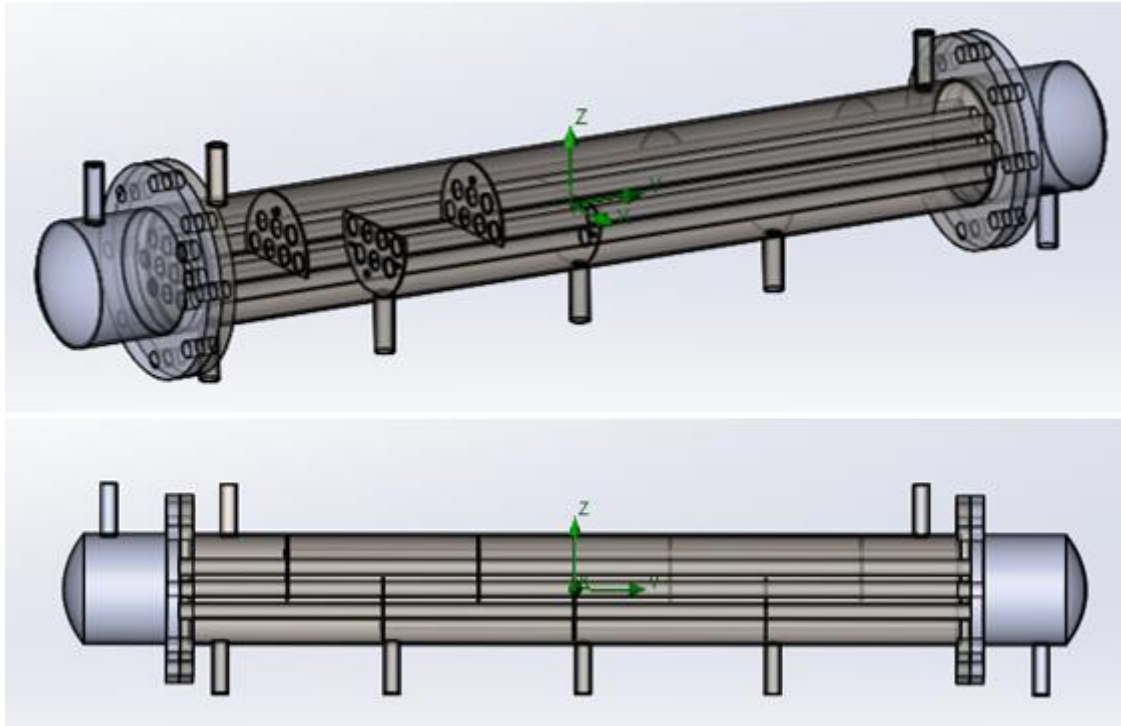


Figura 1: Modelo propuesto.

### 3. PRUEBAS ESTRUCTURALES AL MODELO

Se realizaron análisis estructurales estáticos y simulaciones de flujo. Sin embargo, lo primero que se propuso fue el material a utilizar, ya que como se mencionó anteriormente la corriente es ácida y levemente corrosiva. Se propuso utilizar un acero inoxidable ya que tolera las condiciones químicas de la corriente y soporta altas temperaturas. Para esta aplicación en particular se optó por la familia de los aceros austeníticos ya que tienen una excelente soldabilidad, son funcionales a temperaturas extremas y resisten a la corrosión. Si bien dentro de esta familia hay diferentes aleaciones, las más utilizadas y por lo tanto disponibles en el mercado son el acero inoxidable 304 y 316. Para este diseño se opta por utilizar acero 316 ya que tiene mejor resistencia a la corrosión y un coeficiente de dilatación térmica menor, lo que conlleva menores deformaciones ante la exposición a altas temperaturas. En particular se utiliza el 316L ya que es una mejor opción cuando es necesario realizar soldadura [6].

Como primer estudio se realizó un análisis de flujo, este consiste en simular las características termodinámicas que tendrá la corriente que circulará por el ensamble de forma de poder extraer datos térmicos, de presión y de velocidad de fluido. Esto tiene como objetivo utilizar estos valores luego como cargas en un análisis estático. Se muestran en la Tabla 1 los datos ingresados como condiciones de entrada.

Tabla 1: Condiciones de borde para el análisis de flujo.

Variable	Corriente fría (agua)	Corriente caliente (gas pirolítico)
Caudal másico	100 kg/h	4.3 kg/h
Temperatura de entrada	293K	450K

Cabe destacar que la temperatura de ingreso al intercambiador de calor es menor que aquella de salida del reactor de pirólisis ya que antes de ingresar al condensador atraviesa un ciclón donde, además de eliminar las partículas sólidas, se genera una pérdida de calor.

Como resultado de este análisis se obtienen las velocidades de ambos fluidos a la salida, las temperaturas de cada uno y del material, y el perfil de flujo de cada uno. Se puede observar en la Figura 2 y 3 respectivamente el flujo de fluido caliente por la coraza y el fluido frío por los tubos del condensador. Se puede apreciar en la Figura 2 el incremento de la zona de contacto entre ambas corrientes con el agregado de los deflectores longitudinales con un corte del 40%. A la hora de diseñarlo y decidir la cantidad óptima de estos se utilizó el criterio fijado en las normas T.E.M.A (por su sigla en inglés The Tubular Exchanger, Manufacturers Association) en el cual se propone que la distancia mínima entre dos deflectores no puede ser menor a un quinto del diámetro del intercambiador para que no obstaculice el flujo. Además, se tomó en cuenta que debía ser una cantidad impar de forma de orientar al flujo gaseoso de salida hacia arriba y con un corte de 40% ya que se considera dentro de los valores óptimos. Se presenta en dichas figuras el perfil térmico de cada una de las corrientes donde se aprecia el rendimiento del arreglo propuesto. Por el lado de la corriente fría se observa que, como se había propuesto, el cambio de temperatura no es significativo, mientras que la corriente caliente disminuye 150K su temperatura de forma de asegurar que toda la fracción condensable lo haya hecho. Como resultado de este análisis se obtiene que de la corriente gaseosa original que ingresa al condensador, el 70% se condensa en aceite pirolítico.

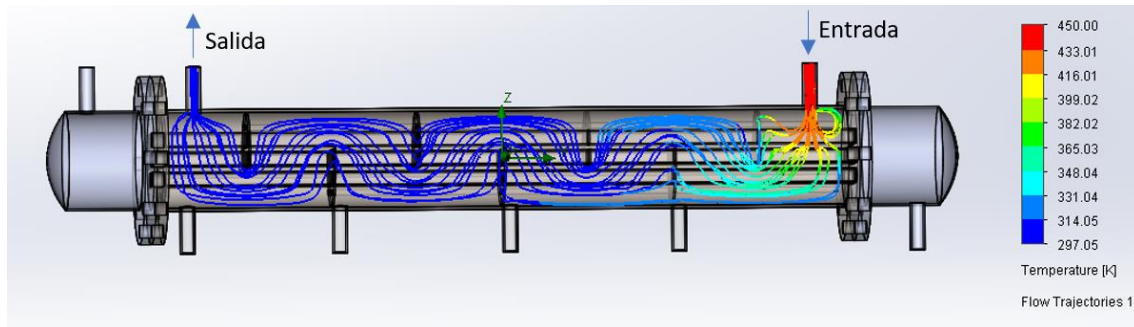


Figura 2: Temperatura del flujo de corriente gaseosa caliente por la coraza.

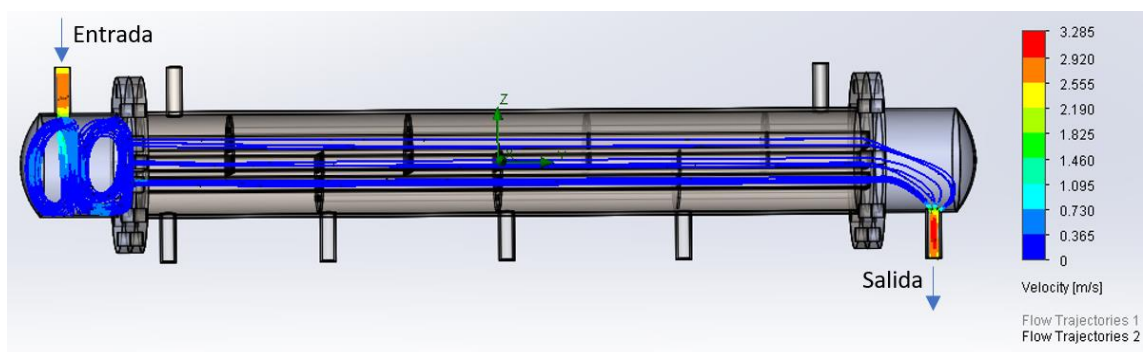


Figura 3: Velocidad del flujo de corriente de agua por los tubos.

Los resultados de la simulación se ingresaron al análisis estático como cargas externas a los fines de obtener los esfuerzos a los que se someterá el acero inoxidable del condensador. Puntualmente, se plantearon como cargas el perfil térmico, la presión del fluido y la tensión de corte de fluido en los tres ejes. Otro parámetro necesario para hacer el estudio es indicar los puntos de sujeción de la pieza. Se consideró que se mantiene fija la brida a la cual está sujeto el haz de tubos (la de la derecha en la Figura 4) y se le agrega condiciones de desplazamiento horizontal a cada uno de los tubos y a la coraza. Con todas estas condiciones establecidas y seleccionando el material, se realizó un estudio por elementos finitos. Para ello se creó la malla deseada y se llevó a cabo el análisis, obteniendo como resultados los perfiles de tensión, desplazamientos y deformaciones unitarias.

Se observa en la Figura 4 el perfil de tensión obtenido al realizar dicho estudio. Al analizar dicha figura se puede observar que en ningún punto del arreglo se supera la tensión máxima permitida.



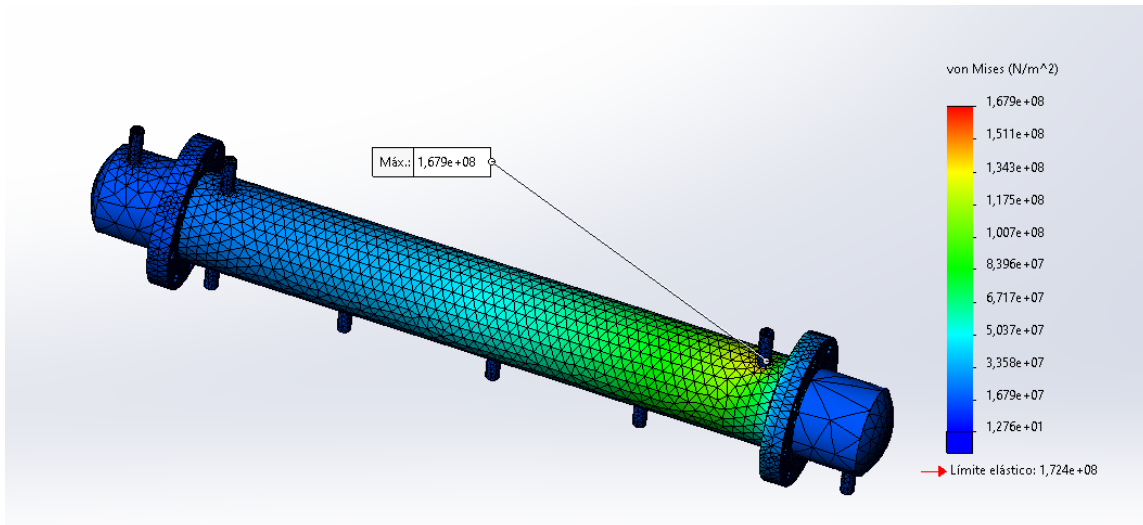


Figura 4: Tensiones de Von Mises en la coraza de acero inoxidable 316L.

Se analizaron las tensiones según el criterio de Von Mises para determinar si en algún punto del arreglo estas superan el límite y como era esperado, la tensión máxima se encuentra sobre la coraza en la zona donde entra en contacto la corriente caliente gaseosa con el acero inoxidable. Se concluye entonces que, para este tipo de proceso, los mayores esfuerzos se relacionan con las cargas térmicas y la diferencia de temperatura entre el gas circulante dentro de la coraza y la temperatura ambiente donde se encuentra el equipo. Este fenómeno también era esperado debido a que se plantea un proceso de pirólisis a presión atmosférica, por lo que esta no debería generar ningún problema al material.

En la Figura 5 se pueden observar los desplazamientos en las distintas zonas del condensador analizado.

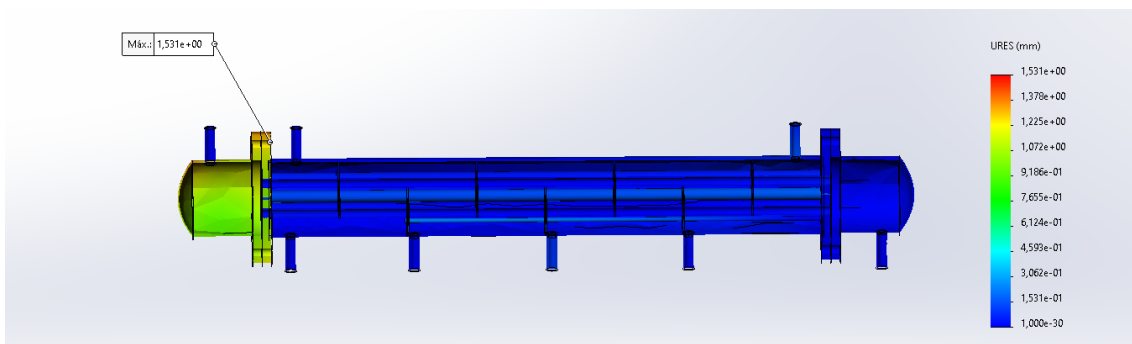


Figura 5: Desplazamientos.

Como se mencionó anteriormente, la brida derecha se considera fija y tanto la coraza como el haz de tubos se considera deslizante hacia la izquierda. Por lo tanto, era esperado que el máximo desplazamiento se encontrara en el casquete izquierdo del condensador debido a la dilatación

de la coraza por efecto térmico. Sin embargo, el máximo desplazamiento encontrado es de 1.5 mm, valor que puede ser compensado al utilizar un sellador de alta temperatura que, al ser un elastómero, absorbe el desplazamiento y no permite el paso del gas evitando así fugas.

#### 4. CONCLUSIONES

Mediante el uso de dinámica computacional se diseñó un condensador de 4 etapas con el objetivo de maximizar la eficiencia del proceso de pirólisis para generar aceites pirolíticos. En primer lugar, se desarrolló un modelo termoquímico para conocer la cantidad y características de gas de pirólisis obtenido. Con estos datos se simuló configuraciones adecuadas para cumplir con el objetivo propuesto de disminuir la temperatura de la corriente hasta que toda la fracción condensable lo haya hecho. Así se optó por un intercambiador de calor tipo BEM de 1000 mm de largo y 200 de diámetro, con 7 deflectores longitudinales con un corte del 40%. El fluido frío (100 kg/h de agua) circula por los tubos, mientras que el fluido caliente (4.3 kg/h de gas pirolítico) lo hacen por la coraza, de forma que se pueda extraer el aceite por las 4 aberturas propuestas a medida que los compuestos condensen. Como la corriente caliente es levemente ácida y corrosiva se opta por un acero 316L como material para este intercambiador de calor.

Una vez seleccionado este arreglo se procedió a realizar análisis estáticos y de flujo para comprobar que sea apto para el proceso. En segundo lugar, se realizó un análisis de flujo de forma de obtener los parámetros termodinámicos que serán ingresados como cargas en un análisis estático. Luego, mediante elementos finitos, se realizó el análisis estático donde se observó el perfil de tensiones y desplazamientos de la pieza. Al analizar dichos perfiles se concluyó que las mayores cargas presentes en este arreglo son térmicas, ya que los valores de tensiones más altos se encuentran en el punto donde el gas caliente (450K) que ingresa, se pone en contacto con la coraza. Sin embargo, en ningún punto se observó que se sobrepase la tensión máxima al ser analizada por el criterio de Von Mises, por lo que el acero 316L es un material adecuado para el proceso. Por último, se observó que el máximo desplazamiento ocurre en el cabezal izquierdo producto de la dilatación de la coraza.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la empresa Canale S.R.L. por proporcionar los recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto.

#### 6. REFERENCIAS

[1] Ritchie H., Roser M., Rosado P., (2022) - "Energía". Publicado en línea en OurWorldInData.org. Obtenido de: '<https://ourworldindata.org/energy>'



- [2] Perera, F. *Pollution from Fossil-Fuel Combustion is the Leading Environmental Threat to Global Pediatric Health and Equity: Solutions Exist*. International Journal of environmental research and public health; 15(1): 16, 2018.
- [3] Lu W., Hackman D., Schwartz J. *Ambient air pollution associated with lower academic achievement among US children*. Environmental epidemiology, 5(6): e174, 2021;
- [4] Al-Rumaihi A., Shahbaz M., McKay G., Mackey H., Al-Ansari T. *A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 167, 2022
- [5] Salvi B.L., Soni T., Jindal S. et al. *Design improvement and experimental study on shell and tube condenser for bio-oil recovery from fast pyrolysis of wheat straw biomass*. SN Applied Science, 3, 173, 2021.
- [6] Alhazaa A., Haneklaus N. *Diffusion Bonding and Transient Liquid Phase (TLP) Bonding of Type 304 and 316 Austenitic Stainless Steel—A Review of Similar and Dissimilar Material Joints*. Metals, 10, 613, 2020